

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400458

研究課題名(和文)地球接近小惑星の力学起源に関する観測的・数値的研究

研究課題名(英文)Observational and numerical studies of the dynamical origin of near-Earth asteroids

研究代表者

伊藤 孝士 (Ito, Takashi)

国立天文台・天文データセンター・助教

研究者番号：40280565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究に於いては近地球小惑星の力学的起源に関する数値的研究、およびそれに相補的な観測的研究を行った。数値的研究に於いては近地球小惑星の発生源となり得る様々な場所のうち、これまで顧みられることが少なかったオールト雲など超遠方の彗星領域が無視できないことが明らかになった。観測的研究に於いては、近地球小惑星の発生機構の一環を為す衝突破壊現象の痕跡であるメインベルト小惑星族構成員の光度曲線観測を行い、衝突破片の形状と自転速度分布に一定の傾向が見られることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the dynamical origin of near-Earth asteroids both in numerical and observational ways. In our numerical study, a result of ours tells us that the Oort Cloud new comets coming from a very distant area outside of the planetary region is not negligible as a source region of the near-Earth asteroids. In our observational study, we have revealed that the rotational velocity distribution of collisional fragments (i.e. young family asteroid members) show certain trend with respect to their shape (i.e. peak to trough variation in their lightcurves). Asteroid families are direct consequence of collisions and disruptions in the solar system, and they have a large significance in understanding evolution processes of the near-Earth asteroids.

研究分野：太陽系力学

キーワード：小惑星 衝突破壊 天体力学 クレーター サイズ頻度分布 オールト雲

1. 研究開始当初の背景

小惑星や彗星などの小天体は太陽系のあちこちで形成したと考えられるが、それらは長い時間をかけて動径方向に移動・拡散し、元の形成場所を大きく離れて現存するものも多い。その典型と言える地球接近小惑星(または近地球小惑星)の力学的起源を観測的証拠と数値実験から検証することで、太陽系進化の一面を明らかにする事が本研究の目的である。その過程ではまた、惑星形成期のやや後に生じたとされる後期重爆撃期の実相や発生機構についても重要な知見が得られると期待される。

本研究の主要な観点は数値計算による太陽系小天体の力学進化である。その結果の妥当性を実証するために光学観測による小惑星のサイズ分布を取得し、比較検証を行う。小惑星の衝突破壊の痕跡である族構成員の自転周期分布の知見獲得をも目的とする。

2. 研究の目的

小天体は太陽系の最初期の情報を保持したまま凍結保存された存在であり、地球などの惑星を形成した部材の残片でもある。特に地球接近小惑星は太陽系の様々な場所から地球近辺に飛来し、太陽系進化の履歴を背負う天体であると考えられており、その学術的な重要度は以下の二点に於いて高い。第一に、地球接近小惑星が具体的にいつどこから地球近辺にやって来たかを知れば、惑星を構成する物質の空間分布が太陽系史に於いてどう変化したのかに関する基礎データの獲得に繋がる。そうしたデータは近年目覚ましい発展を遂げている太陽系外惑星の研究にも大きな寄与を果たすだろう。第二に、小天体は地球などの惑星との衝突を繰り返して来たことも重要である。とりわけ惑星形成から数億年を経た後に地球型惑星や月に激しい衝突が発生したとする後期重爆撃期についてはその機構や持続時間が不明であり、地球接近小惑星の力学進化を解き明かす動機付けの一つである。こうした問題意識を持ち、本研究では地球接近小惑星の力学的な進化過程の解明を目指す。本研究に於いて小惑星の力学進化をモデル化する手法は軌道運動の数値計算だが、計算結果と現実の整合性を確認するために光学観測から小惑星のサイズ分布を取得し、それを月・惑星上のクレーターを作った衝突天体のサイズ分布と比較する。数値計算から得られる衝突天体の衝突確率・速度分布を用いてこの両者が整合的に結合すれば、力学モデルは妥当と言える。

本研究で私達が達成したい物事は以下である。(1)太陽系の幾つかの領域、特にメインベルト(火星-木星間)の中間付近-外側から地球近辺に飛来する小天体と地球型惑星との衝突速度分布・衝突確率とその時間進化を計算する。過去の研究により、地球接近小惑星を地球軌道近辺に輸送する主要な機構のひとつは木星などの巨大惑星が関与する共鳴

帯との重力相互作用であると推測される。本研究ではメインベルトの主な共鳴帯を経由する小天体の軌道進化を高精度の数値実験により再現し、そこから発生する地球接近小惑星の力学進化を検証する。その際にはメインベルトのみならず、海王星以遠やオールト雲など超遠方からやって来る彗星的な天体の軌道進化についても同時に実証する。(2)現在のメインベルトに存在する小惑星のサイズ分布と空間分布を光学観測により推定する。本研究では特にこれまで観測が容易で無かったメインベルト中間付近-外側を特に注視し、直径<約 0.1-1 km の小惑星を数多く観測してそのサイズ分布を算出する。同時に複数のフィルタを用いた多色測光を実施し、小惑星のカラー型の空間分布やアルベドも出来る限り正確に推定する。

上記(1)の数値計算結果と月・惑星上にある新旧のクレーターのサイズ分布をクレーター形成のスケーリング則を介して比較すれば、太陽系史に於いて地球近辺に飛来して来た天体のサイズ分布推定が可能になる。この結果を上記(2)の観測で得られる小惑星のサイズ分布と比較すれば、クレーターを作った衝突天体と小惑星の関係(あるいは無関係)についての情報が得られるであろう。

3. 研究の方法

研究方法と計画は以下の二段階に分かれる。まず、小天体の軌道進化を計算して月や惑星への衝突速度分布や衝突確率を求める数値実験である。この作業は小天体の軌道進化の局面によって更に二分類される。第1は太陽系の各地にある発生源を出発して地球軌道に至る小天体の軌道進化を追う長期・広域の数値実験であり、第2は地球等の惑星の作用圏内に於いて小天体と惑星の衝突速度・衝突確率を計算する局地的な数値実験である。小惑星と月・惑星との衝突に関して数値実験とクレーター記録の照合を統計的に有意なものにするためには、なるべく多くの小天体を数値モデル内に組み込む必要がある。第一段階の数値計算では数十万個の仮想的な小天体を準備し、数億年の時間スケールでそれらの軌道が拡散して地球型惑星の方向へ落下する様子を検証する。この計算での最大の課題は、数十万個という少数の天体を用いた計算にて地球接近天体の惑星への大きな衝突フラックスをいかに模擬するかにある。私達は次に述べる方法を用い、衝突フラックスを惑星近傍のみで局所的に再現する。まず小惑星が各惑星の近傍に到達したら各天体の位置と速度を記録し、その位置・速度データの組を小惑星の軌道要素の分布関数であると解釈する。数値実験から得られる分布関数は離散的であるが、ある程度の天体数を使って得られた分布関数ならば、そこから理想的な状態(=天体数が無限に多い)に得られる筈の滑らかな分布を推定できると考えられる。この前提に基づき、私達は数値実

験から得られた離散的な軌道要素分布を滑らかな関数で近似して、それを元に多数の軌道をランダムに発生させ、それを新しい小天体群の初期軌道として用いる(クローン天体の生成)。作用圏に到達した天体数が仮に十萬個だとしても、例えばこの分布関数を使って千回のクローン生成を行えば一億個の天体群が複製される。その後作用圏内のみにおいてクローン天体の精密な軌道計算を行い、小惑星と惑星との衝突確率や衝突速度等を測定する。クローン天体の個数は膨大となるが、計算領域を惑星作用圏内に限ることで計算量を低減できるので、現実的な時間で計算結果を得られる。こうして得られた衝突速度分布等とクレーター形成のスケーリング則を組み合わせることで、クレーターを作った衝突天体のサイズ分布推定が可能になる。そのサイズ分布を次に記す実際の小惑星のサイズ分布の観測結果と比較してその類似性や相違点を検分することで、太陽系の各地から地球型惑星領域への天体の輸送機構や輸送効率、時間スケールなどに関する情報が得られると予測される。

計画の第二段階は小惑星のサイズ分布および自転周期を推定するための光学観測である。様々な望遠鏡を使い複数のフィルタ(B, R, V, I)を用いて多色測光を行う(アルベド推定用)。なお軌道要素の推定精度を上げるため、衝の近辺のみを観測する。また、データの取得後は画像から太陽系内の移動天体を検出し、その位置と速度から移動天体の軌道要素を推定する。また、特定の小惑星を可能な限り長い時間観測し、光度曲線を得ることで自転周期を推定する。小惑星のサイズ推定については以下の方法を採用する。既知の小惑星には明るくて詳しく観測されている天体も多いが、それら小惑星を測光値の差(B-V, V-I)を見ると、B-Rの値を見るだけでS型とC型に概ね分類出来る。この性質を利用し、私達が検出した小惑星に関してB-Rの値によりS型またはC型に分類する。その後S型、C型天体それぞれの平均的なアルベド(S型なら約0.2, C型なら約0.05, 等)を与えれば、明るさ(絶対等級)と組み合わせることで小惑星のサイズを推定可能となる。

4. 研究成果

研究成果の詳細はすべて「5. 主な発表論文等」に一覧された査読付き論文群に記載されている。本節ではそれらに関連して特に興味深い結果の幾つかを簡単にまとめる。

数値実験の結果に於いて顕著な成果は、近地球小惑星の力学的起源に関してはオールト雲のように超遠方からやって来る天体の寄与が無視できないというものである(下記の学会発表10等)。オールト雲の進化に伴って発生する新彗星の力学進化を最長5億年間の数値積分してみると、新彗星の99%以上は系外に放出された。だが新彗星は放出に至るまでに様々な天体状態を経験し、とりわけ木

星族彗星やケンタウルス族天体、detached TNOsに遷移する確率が高かった。図1には本研究で扱った新彗星が各天体群の軌道要素空間に留まる時間の頻度分布を示す。

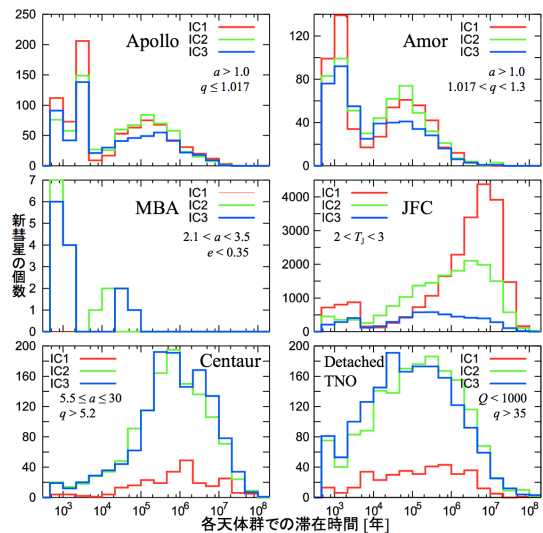


図1. 本研究で扱ったオールト雲起源の新彗星が様々な小天体グループに滞在する時間の頻度分布。各グループの定義は図中に記された軌道要素域である。 T_j は木星を対象とするTisserand判定式。

近地球小天体グループ Apollos と Amors の滞在時間分布(図1の上段)には左側に短時間のピークがあるが、これは一回帰のみで系外放出される新彗星の寄与である。この一時的なピークを過ぎると Apollos や Amors に遷移する天体は減じるが、それでも数十万年から数百万年にわたり近地球小天体となる新彗星は幾つか存在した。この時間は近地球小天体の典型的な力学的寿命とさほど変わらない。各初期条件で用いた新彗星の個数は各十萬個であり、図上段で Apollos または Amors に属する新彗星の総数が数百個から千個であるから、新彗星のうち1%程度は一時的にせよ近地球小天体に遷移することになる。但し実際に観測されている近地球小天体のうち何割がオールト雲起源の新彗星であるかを直ちに算出できる訳ではない。なお一連の計算では地球軌道以内にある Atens ($a < 1\text{AU}$ かつ $Q > 0.983\text{AU}$) や Atiras ($a < 1\text{AU}$ かつ $Q < 0.983\text{AU}$) は発生しなかった。またメインベルト小惑星と同様な軌道半長径を持つ天体は多く発生したが、離心率が現実と同様に小さくなる天体は稀であった。

観測的研究に関しては、天体同士の衝突破壊により形成された族構成員の光度曲線観測で成果が得られた(下記の雑誌論文2等)。小惑星族の中でも年齢の若いものは太陽系に於ける衝突破壊の生々しい痕跡であると考えられる。その代表である Karin 族構成員の光度曲線を観測し、各々の自転周期と小惑星の形状の歪さ度合いを示す光度曲線の振幅(peak to trough)の変化を示したものが図2である。試料の数がまだ多くないので統計的結論には議論の余地があるが、形状が細長い(より歪つな)小惑星ほど自転周期が長い

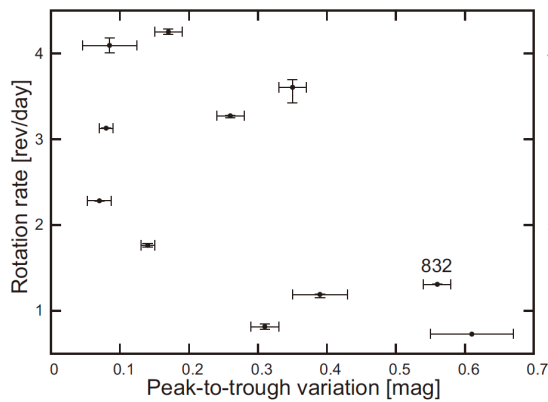


図2. Karin 族小惑星の自転速度(縦軸。周回数/日)と光度曲線の振幅(横軸。peak to trough の変化)。832 は(832) Karin。

傾向が見られる。この結果は天体の衝突破壊時に何らかの形で自転角運動量の等分配が発生した可能性を示しており、太陽系天体の力学進化の一面に何がしかの制約を与える可能性がある。将来的な観測を継続し、試料の数を更に増やす必要がある。

以上のように本研究に於いてはその計画の幾つかの側面に於いて当初期待された通りの成果が得られている。けれども当初の予定通りに進捗したとは言えない部分もあり(例. 外側メインベルト小惑星のサイズ頻度分布と地球型惑星クレーター記録との詳細な比較)、それらを将来の課題に残す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

1. Patryk Sofia Lykawka and Takashi Ito, "Terrestrial Planet Formation: Constraining the Formation of Mercury", *Astrophys. J.*, **838**, 106, 2017. 10.3847/1538-4357/aa6544, 査読有り.
2. Takashi Ito, "High-order analytic expansion of disturbing function for doubly averaged circular restricted three-body problem", *Advances in Astronomy*, **2016**, id 8945090, 2016. 10.1155/2016/8945090, 査読有り.
3. Fumi Yoshida, Takashi Ito, Budi Dermawan, T. Nakamura, S. Takahashi, M. A. Ibrahimov, Renu Malhotra, Wing-Huen Ip, Wen-Ping Chen, Yu Sawabe, M. Haji, R. Saito, M. Hirai, "Lightcurves of the Karin family asteroids", *Icarus*, **269**, 15-22, 2016. 10.1016/j.icarus.2016.01.004, 査読有り.
4. Robert G. Strom, Renu Malhotra, Zhiyong Xiao, Takashi Ito, Fumi Yoshida, Lillian R. Ostrach, "The inner solar system cratering record and the evolution of impactor

populations", *Research in Astronomy and Astrophysics*, **15**, 407-434, 2015. 10.1088/1674-4527/15/3/009, 査読有り.

5. 伊藤孝士, 太陽系力学に於けるシンプレクティック数値積分, プラズマ・核融合学会誌, **91**, no. 2, 149-153, 2015. http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JS_PF/jspf2015_02/jspf2015_02-jp.pdf, 査読有り.
6. Seitaro Urakawa, Katsuhito Ohtsuka, Shinsuke Abe, Takashi Ito, Tomoki Nakamura, "Fast rotation of a sub-km-sized near-Earth object 2011 XA3", *Astron. J.*, **147**, 121, 2014. 10.1088/0004-6256/147/5/121, 査読有り.

[学会発表](計14件)

1. S. Urakawa, K. Ohtsuka, S. Abe, D. Kinoshita, H. Hanayama, T. Miyaji, S. Okumura, K. Ayani, S. Maeno, D. Kuroda, A. Fukui, N. Narita, G. L. Hashimoto, Y. Sakurai, S. Nakamura, J. Takahashi, T. Tanigawa, O. Burhonov, K. Ergashev, Takashi Ito, Fumi Yoshida, M. Watanabe, M. Imai, K. Kuramoto, T. Sekiguchi, and M. Ishiguro, Observation of near-Earth Object (1566) Icarus and the split candidate 2007 MK6, Planetary Defence Conference 2017, 日本科学未来館, 東京都江東区, May 15-19, 2017.
2. S. Urakawa, K. Ohtsuka, S. Abe, D. Kinoshita, H. Hanayama, T. Miyaji, S. Okumura, K. Ayani, S. Maeno, D. Kuroda, A. Fukui, N. Narita, G. L. Hashimoto, Y. Sakurai, S. Nakamura, Jun Takahashi, Takayuki Tanigawa, O. Burhonov, K. Ergashev, Takashi Ito, Fumi Yoshida, M. Watanabe, M. Imai, Kiyoshi Kuramoto, Tomohiko Sekiguchi, M. Ishiguro, Observation of near-Earth Object (1566) Icarus and the split candidate 2007 MK6, Asteroids, Comets, Meteors 2017, Edificio Polifuncional José Luis Massera, Montevideo, Uruguay, April 10-14, 2017.
3. Marc Fouchard, Arika Higuchi, and Takashi Ito, Flux of "new" long-period comets: confrontation of numerical simulations with observations, Asteroids, Comets, Meteors 2017, Edificio Polifuncional José Luis Massera, Montevideo, Uruguay, April 10-14, 2017.
4. ソフィアリカフィカパトリック, 伊藤孝士, 地球型惑星形成:水星形成の条件に迫る, 日本地球惑星科学連合 2017 年

- 大会, PPS07-17, 東京ベイ幕張ホール, 千葉市美浜区, 2017年5月20-25日.
5. ソフィアリカフィカパトリック, 伊藤孝土, 地球型惑星形成:水星と金星への水供給の検証, 日本地球惑星科学連合 2017年大会, MIS26-P05, 東京ベイ幕張ホール, 千葉市美浜区, 2017年5月20-25日.
 6. 浦川聖太郎, 大塚勝仁, 阿部新助, 木下大輔, 花山秀和, 宮地竹史, 奥村真一郎, 綾仁一哉, 前野将太, 黒田大介, 福井暁彦, 成田憲保, はしもとじょーじ, 櫻井友里, 中村小百合, 高橋隼, 谷川智, Otabek Burhonov, Kamoliddin Ergashev, 伊藤孝土, 吉田二美, 渡辺誠, 今井正亮, 倉本圭, 関口朋彦, 石黒正晃, 地球接近天体(1566) Icarus とその同一起源候補天体 2007 MK6 の可視測光観測, 日本地球惑星科学連合 2017年大会, PPS0-P07, 東京ベイ幕張ホール, 千葉市美浜区, 2017年5月20-25日.
 7. 荒井朋子, 小林正規, 石橋高, 亀田真吾, 千秋博紀, 和田浩二, 渡部潤一, 伊藤孝土, 石黒正晃, 大塚勝仁, 浦川聖太郎, 阿部新助, 関口朋彦, 木下大輔, 吉川真, 中村圭子, 藪田ひかる, 佐々木晶, 木村宏, 中村智樹, 中藤亜衣子, 小松睦美, 三河内岳, 橋省吾, 廣井隆弘, 矢野創, 佐藤幹哉, 並木則行, Srama Ralph, Kruger Harald, 山田学, 船瀬龍, 五十里哲, 尾崎直哉, 稲守孝哉, Sarli Bruno, 岩田隆浩, 岡田達明, 豊田裕之, 西山和孝, 川勝康弘, DESTINY+ミッション: 小型衛星による流星群母天体フライバイ, 日本地球惑星科学連合 2017年大会, PPS02-32, 東京ベイ幕張ホール, 千葉市美浜区, 2017年5月20-25日.
 8. 荒井朋子, 小林正規, 千秋博紀, 和田浩二, 石橋高, 春日敏測, 山田学, 亀田真吾, 大塚勝仁, 渡部潤一, 伊藤孝土, 川勝康弘, Sarli Bruno, 岩田隆浩, 岡田達明, 吉川真, 中村智樹, 藪田ひかる, 佐々木晶, 小松睦美, 中藤亜衣子, 廣井孝弘, 三河内岳, 浦川聖太郎, 阿部新助, 石黒正晃, 木村宏, 橋省吾, 中村良介, 中村 messenger 圭子, 佐藤幹哉, Srama Ralf, Kruger Harald, DESTINY+: Phaethon fLyby with reUSable probe, 日本地球惑星科学連合 2016年大会, 東京ベイ幕張ホール, 千葉市美浜区, 2016年5月22-26日.
 9. 伊藤孝土, 近地球小天体の供給効率と分裂破壊の効果, 日本地球惑星科学連合 2015年大会, 東京ベイ幕張ホール, 千葉市美浜区, 2015年5月24-28日.
 10. Takashi Ito and Arika Higuchi, "Dynamical Behavior of the Oort Cloud New Comets in Planetary Region", American Astronomical Society, DPS meeting #46, #209.32, Tucson, AZ, USA, November 9-14, 2014.
 11. Takashi Ito and Arika Higuchi, "Dynamical Behavior of the Oort Cloud New Comets in Planetary Region", Symposium for JSPS bilateral program "Investigations of rotational features and interior of the Moon and Mars by modern methods of planetary geodesy and VLBI astrometry for SELENE-2, Luna-Glob, ExoMars projects", 国立天文台, 東京都三鷹市, 2014年10月21日.
 12. Takashi Ito and Arika Higuchi, "Dynamical evolution of the Oort cloud new comets", Asia-Oceania Geoscience Society 11th Annual Meeting, ロイトン札幌, 札幌市中央区, 2014年7月28日-8月1日.
 13. Urakawa, S., Ohtsuka, K., Abe, S., Ito, Takashi, Nakamura, T., Fast rotation of a sub-km-sized near-Earth object 2011 XA3, Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2014, Marina Congress Center, Helsinki, Finland, June 30 - July 4, 2014.
 14. Takashi Ito and Arika Higuchi, "Dynamical lifetime of the Oort Cloud new comets under planetary perturbation", Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2014, Marina Congress Center, Helsinki, Finland, June 30 - July 4, 2014.
- { 図書 } (計 0 件)
 { 産業財産権 }
 ○出願状況 (計 0 件)
 ○取得状況 (計 0 件)
6. 研究組織
- (1)研究代表者
伊藤孝土 (ITO, Takashi)
 国立天文台・天文データセンター・助教
 研究者番号: 40280565
- (2)研究分担者
吉田二美 (Yoshida, Fumi)
 国立天文台・国際連携室・専門研究職員
 研究者番号: 20399306
- (3)連携研究者
武田隆顕 (Takeda, Takaaki)
 国立天文台・天文情報センター・広報普及員
 研究者番号: 70413961
- 樋口有理可 (Higuchi, Arika)
 東京工業大学・理工学研究科・流動研究員
 研究者番号: 90597139